



<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-5-67-76>
УДК 549.211 + 535.34



НЕОБЫЧНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЦЕНТРЫ В ФАНТАЗИЙНЫХ КОРИЧНЕВЫХ АЛМАЗАХ

А.И. ДОРОФЕЕВА^{1,*}, С.В. ТИТКОВ^{1,2}

¹ ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук»

35, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия

² ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117937, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Природные коричневые алмазы с фантазийными желтым, оранжевым, красным и зеленым оттенками являются ценным ювелирным сырьем. Их окраска связана с посткристаллизационной пластической деформацией, испытанной в процессе транспортировки из мантии к поверхности Земли.

Цель — изучение точечных дефектов в пластически деформированных алмазах с использованием методов оптической спектроскопии и ИК-спектроскопии.

Материалы и методы. Проведены спектроскопические исследования ограненных коричневых алмазов фантазийных оттенков, представленных на российском рынке. Отобранные образцы были изучены с использованием оптической спектроскопии поглощения в УФ-видимой области и ИК-спектроскопии.

Результаты. В спектрах поглощения УФ-видимой области изученных алмазов наряду с известным континуумом непрерывного поглощения, возрастающего от красной к ультрафиолетовой области спектра, и азотными центрами N3, N3 и 550 нм были выявлены необычные оптические центры. В спектрах желтовато-коричневых алмазов были обнаружены линии 512,9 и 519,9 нм и сопровождающая их широкая полоса с максимумом 480 нм. С этими оптическими центрами связано появление желтоватого оттенка кристаллов. В спектре оранжевато-коричневого алмаза были установлены линии 506,5, 516,1 и 679,7 нм. В зеленовато-коричневом алмазе наблюдались дополнительный континуум поглощения, связанный с одиночными атомами азота, и центры (NV)⁻. Их одновременное присутствие вызывает появление зеленоватого оттенка в окраске алмаза.

Заключение. Оптические центры, вызывающие фантазийные оттенки у природных коричневых алмазов, весьма разнообразны.

Ключевые слова: природные алмазы, коричневая окраска, оптические центры, азотные примеси, пластическая деформация, спектроскопия поглощения в УФ-видимой области, ИК-спектроскопия

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Работа выполнена в соответствии с госзаданием по теме 0136-2018-0011 ИГЕМ РАН.

Для цитирования: Дорофеева А.И., Титков С.В. Необычные оптические центры в фантазийных коричневых алмазах. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2020;63(5):67—76. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-5-67-76>

Статья поступила в редакцию 19.05.2020

Принята к публикации 19.02.2021

Опубликована 30.08.2021

* Автор, ответственный за переписку

UNUSUAL OPTICAL CENTRES IN FANCY BROWN DIAMONDS

ALENA I. DOROFEEVA^{1,*}, SERGEY V. TITKOV^{1,2}

¹ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences
35, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia

² Russian State Geological Prospecting University
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117937, Russia

ABSTRACT

Background. Natural brown diamonds with fancy yellow, orange, red and green tints are valuable jewelry raw materials. Their colour is associated with post-crystallisation plastic deformation occurring during transportation from the mantle to the Earth's surface.

Aim. To study point defects in plastically deformed diamonds using optical and IR spectroscopy.

Materials and methods. Faceted brown diamonds with fancy tints presented on the Russian market were studied spectroscopically. Selected samples were examined using UV-visible optical absorption spectroscopy and IR spectroscopy.

Results. We discovered unusual optical centres in the absorption spectra of the UV-visible region. In addition, the known continuous absorption increasing from the red to the ultraviolet region of the spectrum, as well as the N3 and H3 nitrogen centres and a band at 550 nm, were revealed. In the spectra of yellowish-brown diamonds, the bands at 512.9 nm and 519.9 nm and an accompanying broad band with a maximum of 480 nm were found. The appearance of a yellowish tint of crystals was associated with these optical centres. The bands 506.5 nm, 516.1 nm and 679.7 nm were established in the spectrum of orange-brown diamond samples. An additional absorption continuum associated with single nitrogen atoms and centres (NV)⁻ were observed in greenish-brown diamond samples. Their simultaneous presence causes the appearance of a greenish tint in the diamond colour.

Conclusion. The information obtained using IR spectroscopy indicates that an intense brown colour can occur not only in the most common Ia type crystals according to the physical classification of diamonds, but also in relatively rare Ib + IaA type diamonds.

Keywords: natural diamonds, brown colour, optical centres, nitrogen impurities, plastic deformation, UV-visible absorption spectroscopy, IR spectroscopy

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: The work was performed in accordance with the state task on the topic 0136-2018-0011 of IGEM RAS.

For citation: Dorofeeva A.I., Titkov S.V. Unusual optical centres in fancy brown diamonds. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2020;63(5):67—76. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-5-67-76>

Manuscript received 19 May 2020

Accepted 19 February 2021

Published 30 August 2021

* Corresponding author

Коричневая окраска наиболее широко распространена среди природных алмазов. На некоторых месторождениях, как, например, в лампроитовой трубке Аргайл в Австралии, содержания коричневых кристаллов могут достигать 70% [16]. Даже незначительный коричневый оттенок заметно снижает стоимость алмазов. Интенсивно окрашенные коричневые алмазы раньше вообще относились к техническим категориям. Однако

в последние десятилетия интенсивно окрашенные коричневые алмазы относят к фантазийным, т.е. особенно привлекательным для использования в ювелирных изделиях. Наблюдается постоянный рост интереса к таким камням. Особенно высоко в настоящее время ценятся коричневые алмазы с различными привлекательными оттенками: желтым, оранжевым, красным и зеленым [9, 12]. Рост интереса к коричневым алмазам

в значительной степени обусловлен рекламной активностью компании «Рио Тинто», которой принадлежит месторождение Аргайл. Специалистами этой компании были опубликованы многочисленные статьи в авторитетных международных журналах и предложены привлекательные названия «шампань» и «коньяк» для коричневых алмазов с соответствующими оттенками.

В некоторых российских месторождениях, таких как трубки Айхал, Юбилейная или богатейшие россыпи Анабара на северо-востоке Сибирской платформы [1], также наблюдается повышенное содержание алмазов с фантазийными коричневыми окрасками.

Происхождение коричневой окраски, как было установлено достаточно давно [6], связано с естественной пластической деформацией кристаллов алмаза, которая развивалась под воздействием значительных механических нагрузок, испытанных алмазами во время их транспортировки из мантии к поверхности Земли кимберлитовыми или лампроитовыми магмами. Экспериментально было установлено, что кристаллы алмазов переходят из хрупкого в пластичное состояние при температурах порядка 1200 °С.

В оптических спектрах поглощения пластически деформированных коричневых алмазов наблюдается континуум непрерывного поглощения, монотонно возрастающего от длинноволновой к коротковолновой части видимого спектра. Традиционно такой континуум поглощения связывается с образовавшимися в результате пластической деформации дислокациями в структуре алмаза (линейные дефекты, которые образованы атомами, несколько смещенными из своих нормальных положений в структуре) [3, 6, 7, 21]. Интенсивность коричневой окраски коррелирует с концентрацией проявляющихся в спектрах ЭПР центров N2, которые на этом основании рассматриваются в качестве парамагнитных аналогов оптических центров коричневой окраски [6]. Долгое время парамагнитные центры N2 связывались непосредственно с деформационными дислокациями (точнее, со свободными связями в их ядре). Вместе с тем на основании данных метода двойного электронно-ядерного резонанса можно заключить, что центры N2, с которыми связана коричневая окраска, представляют собой не просто деформационные дислокации, а деформационные дислокации, декорированные примесями азота [см. 5].

Согласно другой точке зрения, высказанной на основании теоретических расчетов, коричневая

окраска алмазов связана с весьма необычными дефектами — скоплениями порядка 60 вакансий, образующимися в структуре алмаза в результате пластической деформации [13]. Такие дефекты весьма сложно наблюдать с использованием метода просвечивающей электронной микроскопии и соотнести с каким-либо парамагнитным центром. Основным аргументом в пользу этой теории и для отказа от дислокационной теории является тот факт, что при исчезновении коричневой окраски под влиянием экспериментального высокотемпературного отжига плотность дислокаций не уменьшается [20]. Но если центры окраски представляют собой не просто дислокации, а дислокации, декорированные примесями азота, то под влиянием отжига может происходить их «очищение» от примесной атмосферы [5]. При этом сами дислокации будут сохраняться (многочисленные работы в области материаловедения показали, что удалить образовавшиеся в кристалле дислокации вообще практически невозможно), а азотно-дислокационные парамагнитные центры N2 должны разрушаться. Это предположение подтверждают экспериментальные данные, свидетельствующие, что при исчезновении коричневой окраски в результате высокотемпературного отжига действительно разрушаются и центры N2 [15].

В спектрах поглощения большинства природных пластически деформированных алмазов на коричневый континуум накладываются азотно-вакансионные электронно-колебательные системы N3 (N₃-V), N3 (N₂-V), являющиеся центрами желтой окраски, и широкая бесструктурная полоса с максимумом 550 нм, представляющая собой центр лиловой окраски [7, 9]. Полоса 550 нм, очевидно, является оптическим аналогом сложного парамагнитного центра M2, который образован двумя изоморфными атомами азота, разделенными несколькими цепочками из атомов углерода в структуре алмаза (N-C₂-C₄-C₂-N⁺) [18]. Эта полоса, в отличие от большинства других оптических центров, до сих пор не была воспроизведена экспериментально и является диагностическим критерием природного происхождения алмаза. Образование центров N3 и M2 связано с разрушением под влиянием пластической деформации широко распространенных в природных алмазах азотных центров A (N-N). Если интенсивность поглощения оптических центров N3, N3 и 550 нм значительна, то коричневые алмазы приобретают ценные фантазийные оттенки — желтый, оранжевый или красный, в зависимости от соотношения содержаний данных центров.

Нами при проведении исследований коллекции коричневых алмазов с различными фантазийными оттенками, представленных на российском рынке, были обнаружены кристаллы с необычными оптическими центрами. В настоящей работе приведены результаты изучения таких алмазов с использованием методов оптической спектроскопии и ИК-спектроскопии.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований из серии около 100 коричневых ограненных алмазов, поступающих на российский рынок, были отобраны образцы с фантазийными оттенками, которые были изучены с использованием оптической спектроскопии поглощения в УФ-видимой области и ИК-спектроскопии. Отобранные бриллианты имели массу от 0,31 до 0,86 кар. В настоящей работе приведены результаты спектроскопических исследований наиболее интересных образцов, цвет которых по системе Геммологического института Америки (GIA) [14] был определен как фантазийный желтовато-коричневый, фантазийный глубокий оранжево-коричневый и фантазийный интенсивный зеленовато-коричневый. Их коммерческие определения — «шампань», «коньяк» и «олива» соответственно.

Определение цвета и фотографирование образцов были выполнены с использованием геммологического просмотрового кабинета Judge II (Macbeth), который используется в GIA и обеспечивает стандартизированные условия просмотра с источником освещения, имитирующего дневной свет (цветовая температура 6500 К).

Спектры поглощения в УФ, видимой и ближней ИК-областях были записаны с использованием волоконно-оптического спектрометра OceanOptics QE65000, позволяющего проводить измерения в диапазоне 200—1100 нм при комнатной и азотной (–196 °С) температурах. ИК-спектры были зарегистрированы на ИК-Фурье-спектрометре ALPHA (Bruker Optic GmbH) в области 500—4000 см⁻¹ с использованием сменного модуля ALPHA-Drift для записи спектров ограненных камней.

Результаты и их обсуждение

Детальное геммологическое исследование показало отсутствие какой-либо искусственной обработки изученных алмазов. В частности, присутствующие во всех кристаллах черные микровключения имели характерный неизменный вид. Они представляют собой сульфиды и типичны для природных алмазов.

С использованием геммологического микроскопа в изученных коричневых алмазах были выявлены характерные признаки естественной пластической деформации, в частности неравномерное распределение цвета и его концентрация вдоль системы параллельных плоскостям {111} полос скольжения, разориентированные микроблоки и объемные напряжения. Также в исследованных образцах наблюдались микротрещины, являющиеся результатом хрупких деформаций.

Люминесценция при возбуждении длинноволновым и коротковолновым ультрафиолетовым светом у алмазов практически не наблюдалась.

В оптических спектрах поглощения всех изученных пластически деформированных коричневых алмазов наблюдался хорошо известный континуум непрерывного поглощения, монотонно возрастающего от длинноволновой к коротковолновой части видимого спектра и вызывающего появление интенсивной коричневой окраски.

В спектрах поглощения в УФ-видимой области желтовато-коричневого алмаза наряду с коричневым континуумом поглощения, малоинтенсивными центром N3 и слабой размытой полосой 550 нм наблюдались линии 512,9 и 519,9 нм, а также широкая полоса с максимумом 480 нм (рис. 1). По-видимому, линии 512,9 и 519,9 нм связаны с бесфононными переходами, а широкая полоса 480 нм является полосой фононных повторений этих линий. Насколько нам известно, только линия 519,9 нм упоминается лишь в одной монографии, посвященной обработанным алмазам, в качестве критерия природного происхождения камня, но спектры поглощения этого центра не приведены [8]. Эти центры, по всей вероятности, имеют деформационное происхождение. По своему спектральному положению они являются центрами желтой окраски. У изученных образцов интенсивность поглощения центров 512,9 и 519,9 нм в сравнении с коричневым континуумом была невысокой и вызывала появление лишь слабого желтоватого оттенка.

В ИК-спектрах данного алмаза (рис. 2а) присутствуют азотные А (N-N), В (4N-V) центры и плейтлеты (скопление междоузельных атомов в плоскостях {111} кристаллической решетки), с которыми связаны основные линии 1282, 1175 и 1360 см⁻¹ соответственно. При этом интенсивность линии А-центра выше интенсивности линии В-центра. Таким образом, данный кристалл относится к наиболее широко распространенному типу IaAB по физической классификации алмазов [7]. Интенсивность линии 3105 см⁻¹ водородных

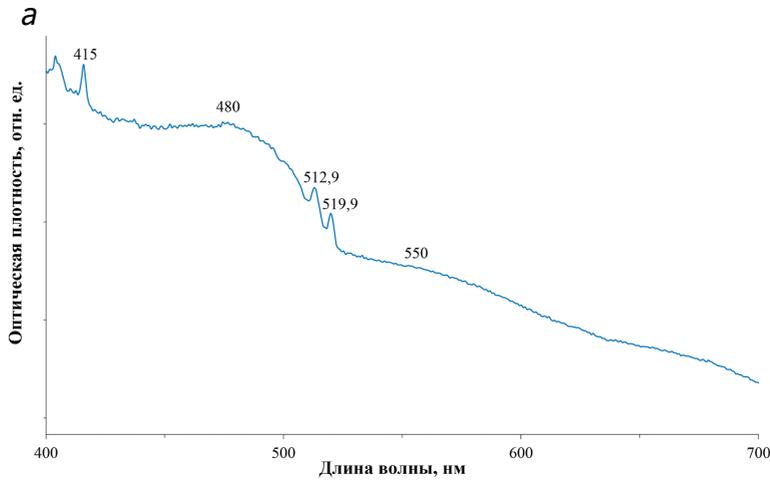


Рис. 1. Спектр поглощения в видимой области при $T = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и фото при свете геммологической лампы (б) желтовато-коричневого ограненного алмаза массой 0,31 кар

Fig. 1. Visible absorption spectrum at $T = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) and photo under the light of a gemological lamp (b) of a yellowish-brown faceted diamond weighing 0.31 ct

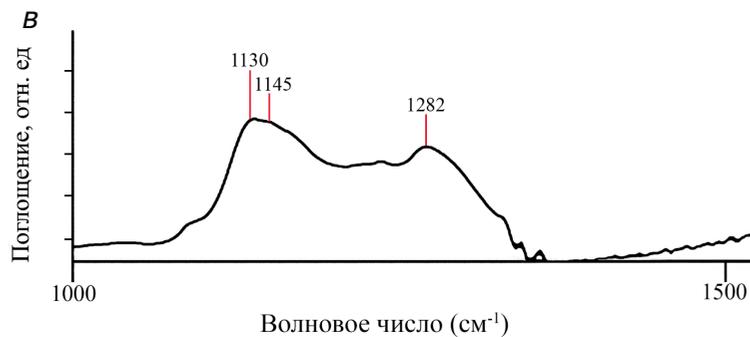
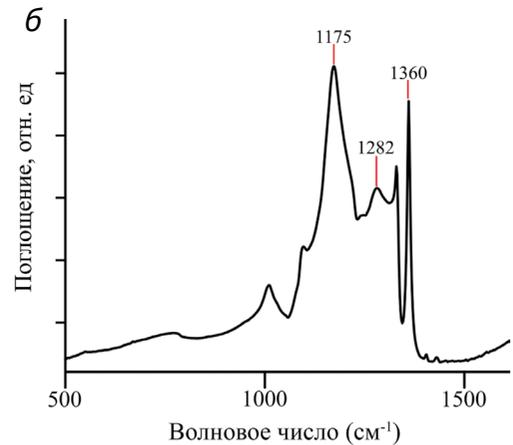
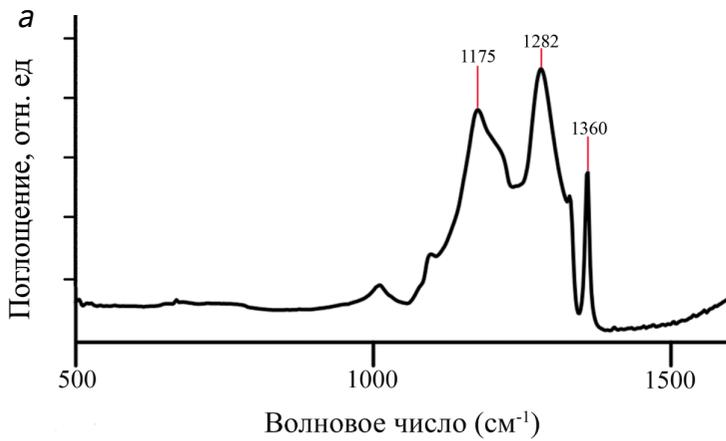


Рис. 2. ИК-спектры в однофононной области изученных алмазов: а — желтовато-коричневого, б — оранжево-коричневого, в — зеленовато-коричневого. Подписаны линии, связанные с различными структурными дефектами: 1130 см^{-1} — C [N], 1145 см^{-1} — Y [N-X?], 1175 см^{-1} — B [4N-V], 1282 см^{-1} — A [N-N], 1360 см^{-1} — плейтлеты [$nC_{interst}$]

Fig. 2. IR spectra in the one-phonon region of the studied diamonds: а — yellowish-brown, б — orangish-brown, в — greenish-brown. Lines associated with various structural defects are signed: 1130 cm^{-1} — C [N], 1145 cm^{-1} — Y [N-X?], 1175 cm^{-1} — B [4N-V], 1282 cm^{-1} — A [N-N], 1360 cm^{-1} — platelets [$nC_{interst}$]

центров была на пределе чувствительности спектрометра.

Спектры поглощения в видимой области густо окрашенного коричневого алмаза с оранжевым оттенком можно было зарегистрировать только от 500 нм из-за высокой оптической плотности. В его спектрах помимо коричневого континуума и интенсивной широкой полосы с максимумом 550 нм наблюдались линии 506,5, 516,1 и 679,7 нм (рис. 3). Эти линии не упоминаются в спектрах поглощения природных алмазов в известных нам работах. Из-за невозможности регистрации спектра данного образца в области длин волн менее 500 нм нельзя установить, связаны ли с линиями 506,5 и 516,1 нм полосы фоновых повторений, влияющие на окраску (это можно будет сделать, когда появится возможность изготовить тонкие пластины из аналогичных кристаллов). Линия 679,7 нм, очевидно, является одиночной.

В ИК-спектрах оранжевато-коричневого алмаза (рис. 2б) также присутствуют азотные А-, В-центры и плейтлеты. Но в нем, в отличие от предыдущего образца, преобладают В-центры и наблюдается повышенная интенсивность линии плейтлетов, т.е. данный алмаз относится к типу IaVA по физической классификации. В его спектре также наблюдается линия 3105 см^{-1} водородных дефектов.

Спектр поглощения алмаза зеленовато-коричневого, или оливкового, цвета оказался весьма необычным (рис. 4). Данный кристалл также характеризуется высокой оптической плотностью, и его спектры поглощения можно было зарегистрировать только от 480 нм. В полученных спектрах на коричневый континуум поглощения постепенно

усиливающейся от красной к УФ области спектра, очевидно, накладывается другой континуум поглощения, который начинается в области 520 нм и более резко возрастает к УФ-области. Второй континуум встречается в природных алмазах достаточно редко. Традиционно он приписывался С-центрам, которые проявляются также в ИК-спектрах и представляют собой одиночные атомы азота, изоморфно замещающие углерод в структуре алмаза [7, 21]. Позднее была показана более сложная природа данного континуума поглощения, обусловленного, по-видимому, присутствием и других центров, в частности, Y-центров [11, 19]. Кроме того, в спектре поглощения зеленовато-коричневого кристалла наблюдаются центры (NV)⁻ с бесфононной линией 637 нм, которые образованы атомом азота в комплексе с вакансией в структуре и имеют отрицательный заряд (специального буквенного обозначения не имеют), и H2 с бесфононной линией 987 нм, которые состоят из двух атомов азота и вакансии и имеют отрицательный заряд. С одновременным присутствием дополнительного континуума, начинающегося в области 520 нм, и центра (NV)⁻ связано появление у изученного кристалла слабого зеленоватого оттенка, который значительно повышает стоимость камня.

Центр (NV)⁻ характерен для искусственно облученных и отожженных алмазов [7, 21]. Однако он был обнаружен и в природных алмазах — в спектрах фотолюминесценции пластически деформированных кубических кристаллов типов IaA и IaA+Ib из россыпей северо-востока Сибирской платформы [2], из россыпей Зимы

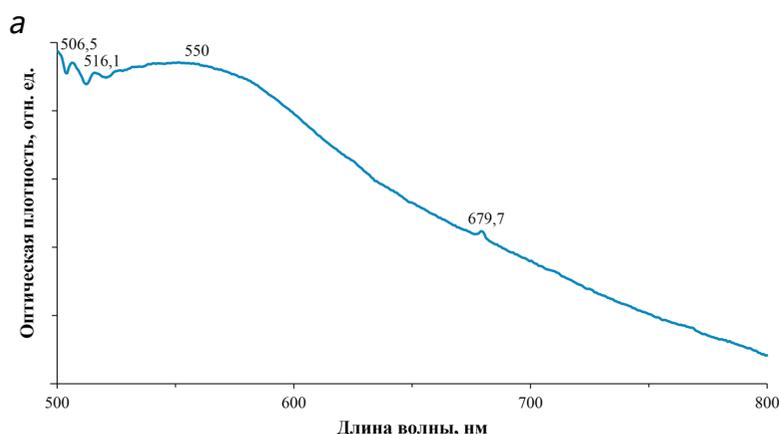


Рис. 3. Спектр поглощения в видимой области при $T = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и фото при свете геммологической лампы (б) оранжевато-коричневого ограненного алмаза массой 0,86 кар

Fig. 3. Visible absorption spectrum at $T = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) and photo under the light of a gemmological lamp (b) of an orange-brown faceted diamond weighing 0.86 ct

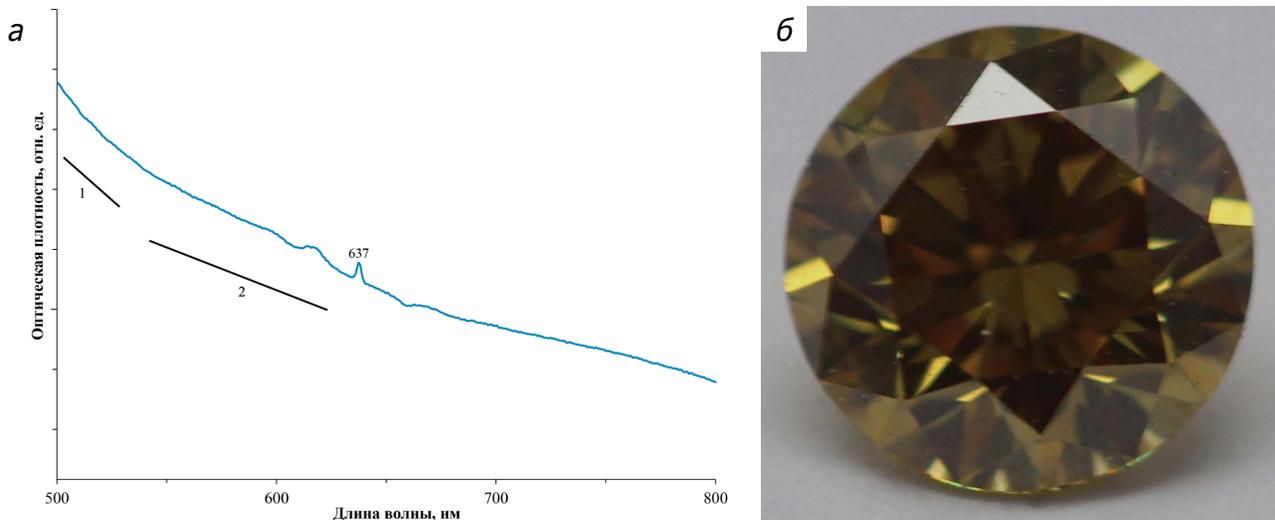


Рис. 4. Спектр поглощения в видимой области при $T = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и фото при свете геммологической лампы (б) зеленовато-коричневого ограненного алмаза массой 0,66 кар. Показаны континуум поглощения одиночных изоморфных атомов азота (1) и дислокаций, декорированных атомами азота (2)

Fig. 4. Visible absorption spectrum at $T = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) and photo under the light of a gemological lamp (b) of a greenish-brown faceted diamond weighing 0.66 ct. Shown is the absorption continuum of single isomorphous nitrogen atoms (1) and dislocations decorated with nitrogen atoms (2)

Центрально-Африканского кратона [17] и в спектрах поглощения ограненных кристаллов типа Ib [11]. Причем в ограненном природном кристалле типа Ib центр $(\text{NV})^-$ находился совместно с центром H2 (N-V-N)^- , как и в изученном алмазе. Образование центров $(\text{NV})^-$ и H2 (N-V-N)^- в природных алмазах, очевидно, связано с присоединением к азотным С (N) и А (N-N) центрам вакансий, образующихся при неконсервативном движении деформационных дислокаций в процессе пластической деформации.

Как свидетельствуют данные ИК-спектроскопии, зеленовато-коричневый алмаз содержит пониженное количество изоморфных примесей азота. В его спектре наблюдаются С-, Y- и А-центры, причем интенсивность линий А-центров слабее (рис. 2в). Y-центр недавно был выявлен в природных алмазах. Предполагается, что он образован одиночным атомом азота, структурная позиция которого отличается от позиции С-центра [10]. Возможно, при этом проявляется влияние другого удаленного атома азота, когда, по существу, происходит образование другого центра [19]. Изученный кристалл относится к редкому типу Ib+IaA по физической классификации алмазов. Такой набор азотных дефектов характерен для алмазов кубического габитуса II разновидности по минералогической классификации Ю.Л. Орлова [3, 4]. По всей

вероятности, данный алмаз до огранки имел кубический габитус.

Водородные центры в его спектре полностью отсутствуют.

Заключение

Таким образом, можно заключить, что оптические центры в алмазах с фантазийными коричневыми окрасками весьма разнообразны. Общей особенностью оптических спектров поглощения таких алмазов является континуум непрерывного поглощения, который монотонно возрастает от красной к ультрафиолетовой области. Часто на него накладываются центры окраски N3, H3 и 550 нм, которые сложены различным количеством изоморфных атомов азота, образующих различные конфигурации в структуре. В результате проведенных исследований в спектрах желтовато-коричневых алмазов были выявлены линии 512,9 и 519,9 нм и сопровождающая их широкая полоса с максимумом 480 нм. Они являются центрами желтой окраски. В спектре оранжево-коричневого алмаза были установлены линии 506,5, 516,1 и 679,7 нм. В зеленовато-коричневом алмазе наблюдались дополнительный континуум поглощения, связанный с одиночными атомами азота, и центры $(\text{NV})^-$. Одновременное присутствие дополнительного континуума

и центра (NV)⁻ вызывает появление зеленоватого оттенка у кристалла.

Согласно данным ИК-спектроскопии, желтовато-коричневый и оранжево-коричневый алмазы относятся к типу Ia по физической классификации алмазов, а зеленовато-коричневый — к типу Ib+IaA. Поэтому можно заключить, что интенсивная коричневая окраска может возникать в процессе пластической деформации

не только у широко распространенных кристаллов типа Ia, но и у относительно редких алмазов типа Ib+IaA, характерной особенностью которых является присутствие центров (NV)⁻, образующихся в результате присоединения вакансий к одиночным изоморфным атомам азота в структуре кристаллов в процессе посткристаллизационной пластической деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зинчук Н.Н., Коптиль В.И.* Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: Недра, 2003. 603 с.
2. *Зудина Н.Н., Титков С.В., Сергеев А.М., Зудин Н.Г.* Особенности центров фотолюминесценции в кубических алмазах с различной окраской из россыпей северо-востока Сибирской платформы // Записки Российского минералогического общества. 2013. Ч. CXLII. № 4. С. 57—72.
3. *Орлов Ю.Л.* Минералогия алмаза. 2-е изд. М.: Наука, 1984. 264 с.
4. *Титков С.В., Ширяев А.А., Зудина Н.Н., Зудин Н.Г., Солодова Ю.П.* Структурные дефекты и неоднородность их распределения в кубических кристаллах алмаза II разновидности из россыпей северо-востока Сибирской платформы по данным ИК микроспектроскопии // Геология. Геофизика. 2015. Т. 56. № 1—2. С. 455—466. DOI: 10.15372/GiG20150126
5. *Титков С.В.* Изоморфные примеси в природных алмазах и их генетическое значение: дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 2018. 205 с.
6. *Щербакова М.Я., Соболев Е.В., Надолинный В.А., Аксенов В.К.* Дефекты в пластически деформированных алмазах по оптическим и Э.П.Р. спектрам // Доклады АН СССР. 1975. Т. 225. № 3. С. 566—569.
7. *Collins A.T.* The colour of diamond and how it may be changed // J. Gemmol. 2001. V. 27. No 6. P. 335—339.
8. *Dobrinets I.A., Vins V.G., Zaitsev A.M.* HPHT-Treated Diamonds. Springer: Berlin, 2013. 351 p.
9. *Eaton-Magana S., Ardon T., Smit K.V., Breeding C.M., Shigley J.E.* Natural-color pink, purple, red, and brown diamonds: band of many colors // Gems Gemol. 2018. V. 54. No 4. P. 352—377.
10. *Hainschwang T., Fritsch E., Notari F., Rondeau B.* A new defect centre in type Ib diamond inducing one phonon infrared absorption: the Y centre // Diamond Relat. Mater. 2012. V. 21. P. 120—126.
11. *Hainschwang T., Fritsch E., Notari F., Rondeau B., Katrusha A.* The origin of color in natural C center bearing diamonds // Diamond Relat. Mater. 2013. V. 39. P. 27—40.
12. *Hofer S.C.* Collecting and Classifying Colored Diamonds: An Illustrated Study of the Aurora Collection. Ashland Press: New York, 1998. 742 p.
13. *Hounsoms L. S., Jones R., Martineau P. M., Fisher D., Shaw M. J., Briddon P. R., Oeberg S.* Role of extended defects in brown coloration of diamond // Phys. Stat. Solidi. C. 2007. V. 4. No 8. P. 2950—2957.
14. *King J.M., Ed.* GIA colored diamonds color reference charts. Stevens Point: Worzalla Publishing Company, 2006. 16 p.
15. *Nadolinny V.A., Yurjeva O.P., Pokhilenko N.P.* EPR and luminescence data on the nitrogen aggregation in diamonds from Snap Lake dyke system treatment // Lithos. 2009. V. 112S. P. 865—869.
16. *Shigley J.E., Chapman J., Ellison R.K.* Discovery and mining of the Argyl diamond deposit, Australia // Gems Gemol. 2001. V. 37. No 1. P. 26—41.
17. *Smit K.V., D'Haenssens-Johanson U.F.S., Howell D., Loudin L.C., Wang W.* deformation-related spectroscopic features in natural type Ib-IaA diamonds from Zimmi (west African craton) // Mineralogy and Petrology 2018. V. 112. Iss. 1. P. 243—257. DOI: 10.1007/s00710-018-0587-6
18. *Titkov S.V., Shigley J.E., Breeding C.M., Mineeva R.M., Zudin N.G., Sergeev A.M.* Natural-color purple diamonds from Siberia // Gems Gemol. 2008. V. 44. No 1. P. 56—64.
19. *Titkov S.V., Mineeva R.M., Zudina N.N., Sergeev A.M., Ryabchikov I.D., Shiryaev A.A., Speransky A.V., Zhikhareva V.P.* The luminescent nature of orange coloration in natural diamonds: optical and EPR study // Phys. Chem. Miner. 2015. V. 42. Iss. 2. P. 131—141. DOI: 10.1007/s00269-014-0705-x
20. *Willems B., Martineau P.M., Fisher D., Van Royen J., Van Tandeloo J.* Dislocation distributions in brown diamond // Phys. Stat. Sol. 2006. V. 203. No 12. P. 3076—3080.
21. *Zaitsev A.M.* Optical Properties of Diamond: A Data Handbook. Berlin: Springer Verlag, 2001. 502 p.

REFERENCES

- Zinchuk N.N., Koptil' V.I. *Typomorphism of the Siberian Platform Diamonds*. Moscow: "Nedra", 2003. 603 p. (In Russian).
- Zudina N.N., Titkov S.V., Sergeev A.M., Zudin N.G. The features of the photoluminescence centers in cubic diamonds of various color from the placers in the North-East of the Siberian platform // *Zapiski Rossiyskogo Mineralogicheskogo Obschestva*, 2013. P. 142. No 4. P. 57—72 (In Russian).
- Orlov Y.L. *The Mineralogy of the Diamond. 2nd edition*. Moscow: "Nauka", 1984. 264 p. (In Russian).
- Titkov S.V., Shiryaev A.A., Zudina N.N., Zudin N.G., Solodova Ju.P. Defects in cubic diamonds from the placers in the northeastern Siberian platform: results of IR microspectrometry // *Rus. Geol. Geophys.* 2015. V. 56. No 1—2. P. 354—362. DOI: 10.1016/j.rgg.2015.01.026
- Titkov S.V. *Isomorphic impurities in natural diamonds and their genetic significance: doct. geol. and min. sci. diss.* Moscow, 2018. 205 p. (In Russian).
- Shcherbakova M.Ya., Sobolev E.V., Nadolinniy V.A., Aksenov V.K. Defects in plastically deformed diamonds revealed in optical and EPR spectra // *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 1975. V. 225. P. 566—569 (In Russian).
- Collins A.T. The colour of diamond and how it may be changed // *J. Gemmol.* 2001. V. 27. No 6. P. 335—339.
- Dobrinets I.A., Vins V.G., Zaitsev A.M. *HPHT-Treated Diamonds*. Springer: Berlin, 2013. 351 p.
- Eaton-Magana S., Ardon T., Smit K.V., Breeding C.M., Shigley J.E. Natural-color pink, purple, red, and brown diamonds: band of many colors // *Gems Gemol.* 2018. V. 54. No 4. P. 352—377.
- Hainschwang T., Fritsch E., Notari F., Rondeau B. A new defect centre in type Ib diamond inducing one phonon infrared absorption: the Y centre // *Diamond Relat. Mater.* 2012. V. 21. P. 120—126.
- Hainschwang T., Fritsch E., Notari F., Rondeau B., Katrusha A. The origin of color in natural C center bearing diamonds // *Diamond Relat. Mater.* 2013. V. 39. P. 27—40.
- Hofer S.C. *Collecting and Classifying Colored Diamonds: An Illustrated Study of the Aurora Collection*. Ashland Press: New York, 1998. 742 p.
- Hounsom L. S., Jones R., Martineau P. M., Fisher D., Shaw M. J., Briddon P. R., Oeberg S. Role of extended defects in brown coloration of diamond // *Phys. Stat. Solidi. C*. 2007. V. 4. No 8. P. 2950—2957.
- King J.M., Ed. *GIA colored diamonds color reference charts*. Stevens Point: Worzalla Publishing Company, 2006. 16 p.
- Nadolinniy V.A., Yurjeva O.P., Pokhilenko N.P. EPR and luminescence data on the nitrogen aggregation in diamonds from Snap Lake dyke system treatment // *Lithos*. 2009. V. 112S. P. 865—869.
- Shigley J.E., Chapman J., Ellison R.K. Discovery and mining of the Argyl diamond deposit, Australia // *Gems Gemol.* 2001. V. 37. No 1. P. 26—41.
- Smit K.V., D'Haensens-Johanson U.F.S., Howell D., Loudin L.C., Wang W. deformation-related spectroscopic features in natural type Ib-IaA diamonds from Zimmi (west African craton) // *Mineralogy and Petrology* 2018.V. 112. Iss. 1. P. 243—257. DOI: 10.1007/s00710-018-0587-6
- Titkov S.V., Shigley J.E., Breeding C.M., Mineeva R.M., Zudin N.G., Sergeev A.M. Natural-color purple diamonds from Siberia // *Gems Gemol.* 2008. V. 44. No 1. P. 56—64.
- Titkov S.V., Mineeva R.M., Zudina N.N., Sergeev A.M., Ryabchikov I.D., Shiryaev A.A., Speransky A.V., Zhikhareva V.P. The luminescent nature of orange coloration in natural diamonds: optical and EPR study // *Phys. Chem. Miner.* 2015. V. 42. Iss. 2. P. 131—141. DOI: 10.1007/s00269-014-0705-x
- Willems B., Martineau P.M., Fisher D., Van Royen J., Van Tandeloo J. Dislocation distributions in brown diamond // *Phys. Stat. Sol.* 2006. V. 203. No 12. P. 3076—3080.
- Zaitsev A.M. *Optical Properties of Diamond: A Data Handbook*. Berlin: Springer Verlag, 2001. 502 p.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Дорофеева А.И. — внесла вклад в проведение спектроскопических исследований и анализ полученных результатов, подготовила текст статьи, подготовила иллюстрации к статье.

Титков С.В. — внес вклад в разработку концепции статьи, интерпретацию результатов спектроскопических исследований, подготовил текст статьи.

Alena I. Dorofeeva — contributed to spectroscopic studies and analysis of the results obtained, prepared the text of the article, prepared illustrations for the article.

Sergey V. Titkov — contributed to the development of the concept of the article, interpretation of the results of spectroscopic studies, prepared the text of the article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дорофеева Алена Игоревна* — младший научный сотрудник ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук».

35, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия

e-mail: adorofeevawork@gmail.com

SPIN-код: 4895-8965

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9440-7052>

Alena I. Dorofeeva* — associate researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences.

35, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia

e-mail: adorofeevawork@gmail.com

SPIN-code: 4895-8965

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9440-7052>

Титков Сергей Васильевич — доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук»; профессор кафедры минералогии и геммологии геологоразведочного факультета ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

35, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

e-mail: titkov@igem.ru

SPIN-код: 1111-5626

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4275-9643>

Sergey V. Titkov — Dr. of Sci. (Geol. and Mineral.), leading researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences; Professor of the Department of Mineralogy and Gemmology, Geological Prospecting Faculty, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

35, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: titkov@igem.ru

SPIN-code: 1111-5626

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4275-9643>